

## 多空洞クライストロンのCADに関する研究

著者	影山 隆雄
号	645
発行年	1982
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/11594">http://hdl.handle.net/10097/11594</a>

氏 名	影 山 隆 雄
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 58 年 2 月 9 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 5 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 43 年 3 月 東北大学工学部電気工学科卒業
学 位 論 文 題 目	多空洞クライストロンの CAD に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 小野 昭一      東北大学教授 西田 茂穂 東北大学教授 柴田 幸男      東北大学助教授 水野 皓司

## 論 文 内 容 要 旨

直進形の多空洞クライストロンは、マイクロ波およびミリ波帯での大電力源として、ますます広く使用される傾向にある。これは UHF-TV 放送、衛星通信、粒子加速器そして核融合研究などの分野における大電力マイクロ波応用技術の進展に伴うものであるが、これらの進展は同時に使用する多空洞クライストロンの性能に高度な要求を課している。

本研究の目的は、種々の応用分野における多様な要求に応えられる CAD システムを確立し、多空洞クライストロンの一層の高性能化を図ることである。

第 1 章では、多空洞クライストロンの CAD の意義とシステムを確立する上での問題点について述べた。CAD の目的は、実物を作る代りに計算機によるデジタルシミュレーションを繰返し、複数の設計案の選択と複雑な設計結果の確認を行うことであるが、このような目的を達成するためには、構成要素のモデル化を高次なものとし、デジタルシミュレーションによる予測精度を高めることが重要である。そこで、モデル化を高次なものとするという立場から、クライストロンの動作解析に関する研究の歩みを概観し、本研究における問題点の所在を明らかにした。

第 2 章では、多空洞クライストロンの小信号解析理論について述べた。小信号動作解析に関する研究は、数多くなされており本質的な問題はない。しかし、これまでのアプローチは、相互作用空

間が電子ビームの低減プラズマ波長に比して十分小さいと見なし、集中結合を仮定したものであった。大電力の多空洞クライストロンでは無格子間隙であるので、電界分布を考えると相互作用空間が低減プラズマ波長の5%程度になることがあり、無視するには大きい量であると考えられる。また、単一間隙においても電子ビームとの分布的な相互作用を考えることにより、ビームローディングの物理的な意味を明確にでき、第3章で述べる大信号ビームローディングの導出にも役立つので、分布結合を考慮した小信号理論を展開することにした。

ここでは、まず小信号理論で用いられる仮定を説明し、ついで後の大信号理論においても共通に用いられる単一間隙空洞の等価回路と無格子電界の表わし方について述べた。そのような準備のもとに、電子ビームと無格子間隙電界との相互作用および空洞間の電子ビームによる信号伝搬の問題が、空間電荷波理論を使って統一的に表現できることを示した。そして多空洞クライストロンの小信号電力利得や出力波の位相および飽絡線遅延時間の計算式についても導出した。

第3章では、大信号1次元解析理論について述べた。多空洞クライストロンは、マイクロ波帯における大電力動作に特長があるので、その出力電力や変換効率などの大信号動作特性の予測と最適化がCADでは最も重要なことである。大信号動作を知るためには、非線形の方程式を解かねばならず、膨大な数値計算が余儀なくされる。従来の大信号動作解析の研究では、問題がドリフト領域における電子集群のシミュレーションという点にしばられており、電子ビームと間隙電界との相互作用のシミュレーションについては、ほとんど手がつけられていない。増幅管として大切な入出力特性や出力電力帯域特性などの動作特性をシミュレーションするためには、中間空洞や出力空洞の相互作用において大信号ビームローディングの効果を考慮した大信号理論を確立する必要がある。

したがってここでは、まず大信号理論で用いられる電子ビームの1次元ディスクモデルの考え方を明らかにし、つぎに電子ビームと無格子間隙電界との分布的な相互作用を取扱うための大信号方程式を、電子集群過程と出力間隙におけるエネルギー変換過程とに分けて導出した。従来の大信号理論における問題点は、方程式を閉じた型にするため、相互作用の取扱いについて小信号動作の仮定を行っていたことである。この問題点を解決する目的で今回導出した一連の方程式は、いわゆる開いた型をしているが、この方程式のself-consistentな解を求める数値計算の過程で大信号ビームローディングの効果が自動的に含まれてくることが分った。大信号ビームローディングの効果を明確にするため、本理論によるビームローディングアドミッタンスだけを分離して求め、測定値および小信号理論による結果との比較を行った。

この結果によれば、間隙電圧が微小であるとき、大信号理論によって求めた結果と小信号理論の値はほぼ一致しているが、間隙電圧が大きくなるにつれて小信号理論との差異が大きくなることが分った。特に出力空洞に関しては、間隙電圧が直流ビーム電圧に近づいたとき、ビームローディングコンダクタンスが小信号時の3倍以上に増大すること、およびビームローディングコンダクタンスが急増する点においてサセプタンスの極大値の生じることが示された。

計算値と測定結果との比較においても、その変化の傾向はほぼ一致しており、ビームローディングアドミッタンスが間隙電圧によって、大幅に変わるという本理論の予測が実証された。

第4章では、集束過程の大信号2次元解析について述べた。

はじめに大信号2次元解析で用いられる電子ビームのリングモデルの考え方を説明し、相対論効果を考慮したときの空間電荷電界を導出した。つぎに集束磁束密度の他に相対論効果から導かれる自己誘導磁束密度を含めた運動方程式を展開し、リングモデルによる集束過程の大信号2次元方程式を導いた。そして最後に1次元解析と2次元解析の結果を比較し、ビームリップルが電子集群に与える影響を調べた。

この解析結果によれば、ビームリップルが増大するほど高周波ビーム電流の最大値が低下し、それと同時に電流の最大になる位置が励振側に移動することが示された。これはビームリップルによって空間電荷密度の増大する場所が生じ、集群が抑制されるためであると解釈される。すなわち、多空洞クライストロンの設計に当っては、電子ビームのリップルを少なくすることが、ビーム透過の安定性の点からだけでなく、効率改善の点からも重要であることが分った。

第5章では、本論文で提案した解析理論のCADシステムへの応用について述べた。CADの対象は電子銃、コレクタおよび集束磁界装置を含む電子ビーム系、空洞と真空気密窓を含む高周波回路系、そして熱放散あるいは熱応力を扱う熱・機械系など多岐にわたるが、ここでは、まず図に示すCADシステムの構成について、点線で囲んだ高周波動作解析プログラムと他の解析プログラム

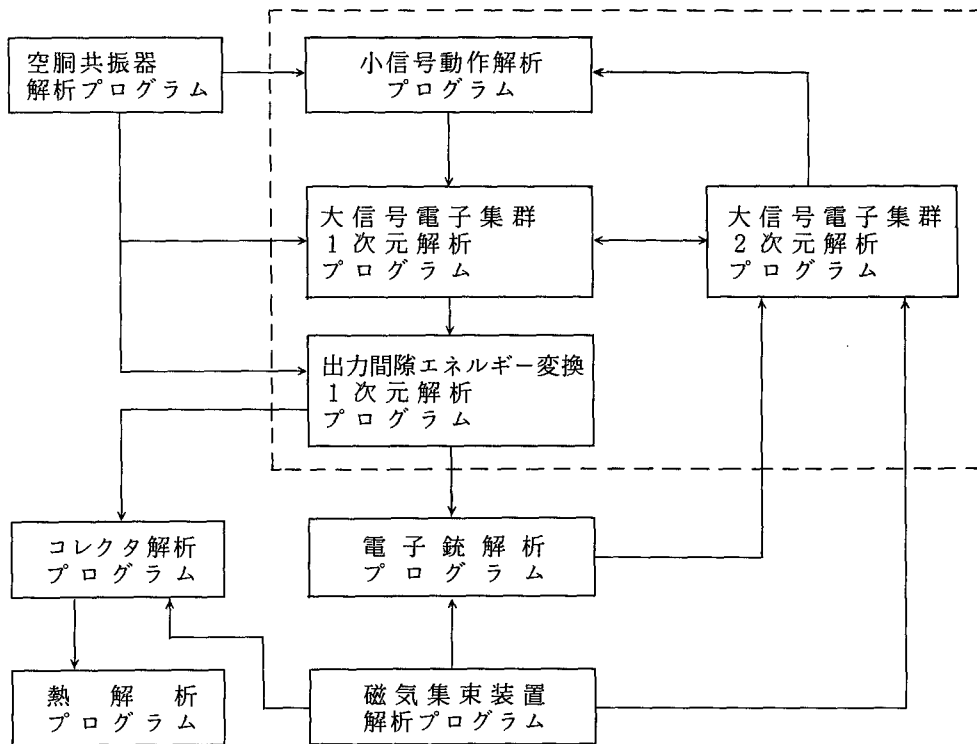


図 多空洞クライストロンのCADシステム構成

関係を説明し、その役割を明確にした。つぎに、CAD システムを道具として使いこなすためには、設計パラメータの意味を十分に理解しておくことが大切であるので、ビームパービアンスやビーム径、間隙走行角、ドリフト走行角、空洞の同調などの主な設計パラメータについて、効率との関係を中心にその意味を述べた。

本 CAD システムは、これまでに衛星通信地球局用準ミリ波大電力クライストロンや核融合研究用ミリ波帯大電力クライストロン、放送・見通外通信用高効率クライストロンなどの開発に適用されてきた。ここでは、その一例として UHF-TV 放送用高効率クライストロンの設計について述べた。UHF-TV 送信機では励振段が固体化されているので、終段電力増幅用のクライストロンの効率改善は、経済的な観点から重要な意義を有している。多空洞クライストロンの効率は、これまで 30～40% であったが、本 CAD システムを適用した結果、60% 台まで改善できるようになった。しかも、小信号電力利得および位相帯域特性や入出力特性、出力位相特性などの動作シミュレーションの結果と実測値との比較においても良い一致が見られ、本 CAD システムの有用性が確認された。

## 審 査 結 果 の 要 旨

近年、衛星通信や核融合プラズマ研究等、種々の分野での大電力マイクロ波応用技術の進展はめざましい。これに伴いマイクロ波、ミリ波帯の大電力管である多空胴クライストロン（以下MCKと略記）に対する要求は、多様化すると共に非常に高度化してきており、その開発には詳細な動作機構の把握と、それに基づく各部の最適設計が不可欠となっている。著者は、上記の観点から専用CADシステムの必要性を痛感し、一連の研究によってこれを確立すると共に、多くの高性能MCKの開発に適用して、その有用性を実証した。

本論文は、その研究の成果をまとめたもので全文6章よりなる。

第1章は総論である。

第2章では、MCKの詳細な大信号動作解析に先立ち、各部設計パラメータの選択範囲を予知するために用いる小信号動作解析について述べている。

第3章は大信号1次元動作解析について述べたものである。ここで著者は、MCKの大信号解析では初めて、各空洞間隙における高周波電界と電子ビームとの分布結合を考慮した大信号方程式を導出し、その自己無撞着な数値解を求める等、解析を高度化することにより、大信号動作時の各空洞におけるビームローディング効果も明確にでき、その効果を含めて設計可能であることを示しているが、これは重要な知見である。

第4章では、電子ビーム集束用磁界強度が有限であることから生ずる、いわゆるビームリップルの電子集団に与える影響を知るために行った大信号2次元解析について述べているが、特にリップルの少ない電子ビーム系の設計が、ビーム透過の安定性の点のみではなく、効率改善の点からも重要であることを明らかにしている。

第5章では、前章までに述べた各解析を主体として構成したCADシステムの全体構成について述べ、またこれを用いて開発したUHF-TV放送用MCKの場合を例として、その有用性について述べている。すなわち、この種のMCKの効率はこれまで40%までであったが、本システムによる設計で60%台のものも実現できたこと、また電力利得や帯域特性等のシミュレーション値は、試作管による実測値と良い一致のえられたことを述べている。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文は高性能MCKを短期日、低コストで開発することを目的に専用CADシステムを確立し、その有用性を実証するに十分な高性能MCKを開発すると共に、MCK動作機構についても多くの知見を与えたもので、電子工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。